

(解説)

最近のステンレス極薄板用圧延設備

Latest Rolling Mill for Ultra Thin Stainless Steel Strips



上杉憲一*
Kenichi UESUGI



岡本雅好*
Masayoshi OKAMOTO



宮園太介*
Taisuke MIYAZONO



片山裕之**
Yasuyuki KATAYAMA



井上哲雄**
Tetsuo INOUE



平永孝志**
Takashi HIRANAGA

Recent progress in the electronics industry has increased thin-rolled flat products. The quality of these products must be extremely high and high performance multi-high rolling mills are in demand. The KT Mill, Kobe Twelve-high Rolling Mill, is a technology developed from the twenty-high mill and the aluminum foil mill. It has numerous superior thickness and flatness control mechanisms and systems. The KT Mill can produce stainless steel foil with minimum 0.01mm thickness and nearly 700mm width. This combination of thinness and width is unique in the industry at present.

まえがき = 近年、電子機器のコンパクト化並びに生産量の拡大にともない、ステンレス業界においては圧延製品の薄物化、品質の向上、生産性向上という要求は年を追うごとに高くなっている。それらの要求を満足するために使用する圧延設備に対しても、必然的に厳しい性能が要求される。

当社はこの要求にこたえるべく、硬質材の冷間圧延に広く使用されている20段圧延設備の特質を生かし、かつアルミ箔圧延設備で培った数々の極薄板対応技術を盛りこんだ12段圧延設備を開発し、1984年に実機1号機を納入した。当社では、12段圧延設備を Kobe Twelve-High Mill の頭文字をとってKTミルと呼んでいる。KTミルは、薄板の品質で最も重要視される板厚および形状(板ひずみ)を良好に制御できる各種のアクチュエータを有し、自動板厚制御装置、自動形状制御装置を具備している(図1)。

また、極薄板圧延で危惧される板表面のしわ発生防止対策、板とロール類とのスリップによる板表面きずへの対策を実施している。本稿では、当社が最近納入したKTミルにおける極薄板冷間圧延に配慮した特有の技術を紹介する。

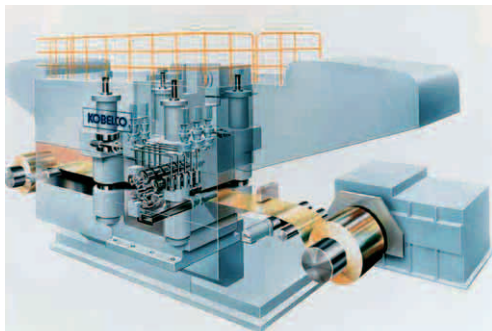


図1 最新のKTミル全体図
Fig. 1 General view of advanced KT mill

1. 最近の納入実績

表1 最近のステンレス極薄板用KTミル納入実績
Table 1 Supply list of KT mill for recent thin stainless rolling

User	Delivery Year	Starting thickness (mm)	Final thickness (mm)	Mill motor (KW)
Nippon Steel Materials Co.,Ltd	2007	0.5	0.01	AC150
HISPEC-1 (West Japan)	2007	0.8	0.05	AC200
Hokuriku Yoshinaka Co.,Ltd (Manufacturing)	2009	1.0	0.03	AC110
Nisshin Steel Co.,Ltd (Manufacturing)	2009	0.45	0.01	AC150
BNG Steel Co.,Ltd (Korea) (Manufacturing)	2009	1.0	0.01	AC250

2007年から2009年に製作・納入予定のステンレス極薄板用KTミルを表1に示す。KTミルは、板幅700mm近くのステンレス箔を最小板厚0.01mmまで生産することができる世界的にも例のない特徴のある冷間リバース圧延機である。品質面においても、極薄板の板厚精度、形状精度、表面品質(しわ、きずなど)を最高級レベルで確保するために各種の配慮をしている。

一方、製品板厚がもう少し厚い用途(0.2-0.05mm)向けのミルとしては、20段圧延設備(KSTミル: Kobe Super Twenty-High Mill)を製作しており、最近では2008年に中国・山東乾元ステンレス有限公司に納入している。

2. KTミルの構造と特徴

KTミルは、上下のハウジングを4本のコラムで係合した4柱式分離型ハウジングミルである(図2)。

2.1 4柱式分離型ハウジングの特長

4柱式分離ハウジングは、以下に示す4つの大きな特

*機械エンジニアリングカンパニー 産業機械事業部 重機械部 **神鋼テクノ株式会社

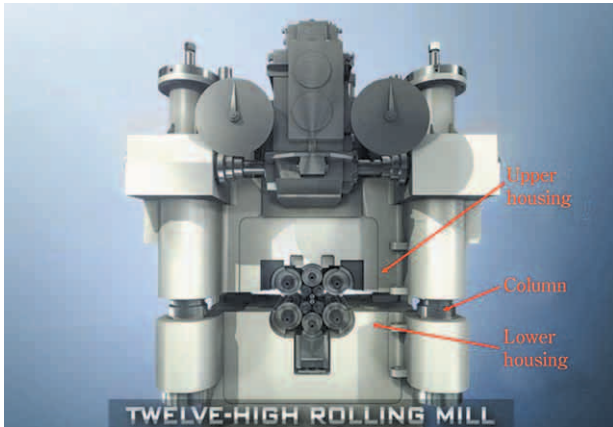


図2 4柱式分離型ハウジングミル
Fig. 2 Four column separate housing mill

長がある。

- 1) 上ハウジングの昇降ストロークを大きくすることにより、ハウジング間のスペースを広く取れるため、以下の利点がある。

鋼種、パスに最適なワークロール径を広い範囲で選択できる。

ワークロールをはじめロール交換の作業性が良好である。

通板の作業性が良好である。(板を視認しやすい)

- 2) 4本のコラム以外にハウジング間をさえぎるものがないためロールクーラントの排出が良好であり、以下の利点がある。

圧延発熱の除去が容易なため、良好な板形状を得やすい。

圧延で発生する磨耗粉などがクーラントとともに排出されやすく、板きずの低減につながる。

- 3) 上ハウジングを傾斜させて圧延ができるため、テーパ材(ウエッジ形状)や非対称形状の材料の圧延も容易に行うことができる。

- 4) 圧延荷重が4本のコラムに引張荷重として作用するため、圧延荷重を正確に検出することができる。さらに、4本のコラム個々に検出した圧延荷重から荷重のバランス(作業側と駆動側の荷重の差)を知ることができる。

2.2 使用可能なワークロール径

KTミルは、上ハウジングを大きく昇降することが可能であることから、図3に示すように小径から大径に至るワークロールを無段階に広い範囲で使用することができる。これにより鋼種・パスに最適なワークロール径を選択することができる。

ワークロール径の変更に伴いパスライン高さが上下するが、図4に示すKTミル独自のミルガイド昇降用の自動パスライン調整装置、およびワークロールの端面を保持するスラストブロック自動昇降装置を具備することにより、パスラインを水平に保つことができる。

表1で示した5台のKTミルは、ワークロール直径を最小28mmから最大60mmないしは80mmまで無段階で変更可能である。したがって、40mm、50mmといった中間サイズのワークロールを選定することも可能であり、

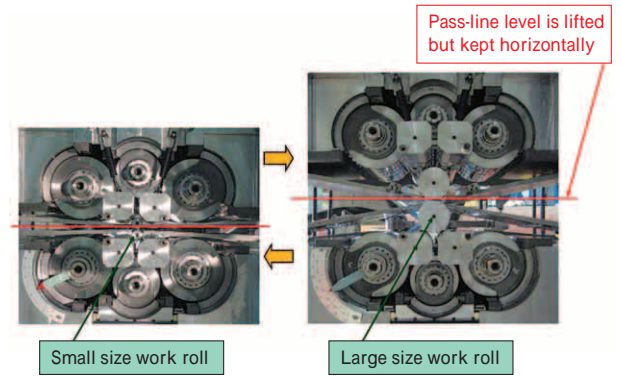


図3 最適ワークロール径選択
Fig. 3 Most suitable work roll diameter selection

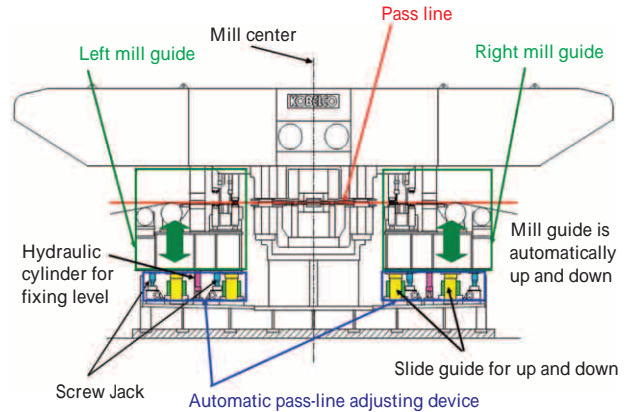


図4 ミルガイド昇降用自動パスライン調整装置
Fig. 4 Automatic pass line adjusting device for mill guide level change

生産性重視(強圧下可能)の小径ロールによる圧延と形状重視の大径ロールによる圧延を1台のミルで実施することができる。

3. 板厚・形状制御用アクチュエータ

KTミルの板厚および形状制御用アクチュエータの配置を図5に示す¹⁾。

3.1 板厚制御アクチュエータ

KTミルは、サーボ弁を直結したウエッジ式油圧下装置を板厚制御専用のアクチュエータとして具備している¹⁾(図6)。圧延荷重はウエッジを介して直接ハウジングに伝達される構造であり、極めて剛性が高い。

コラム部に油圧室を設けた方式の多段ミルや、4段/6段ミルのようにプッシュアップシリンダもしくはプッシュダウンシリンダを設けた形式のミルでは、油圧シリ

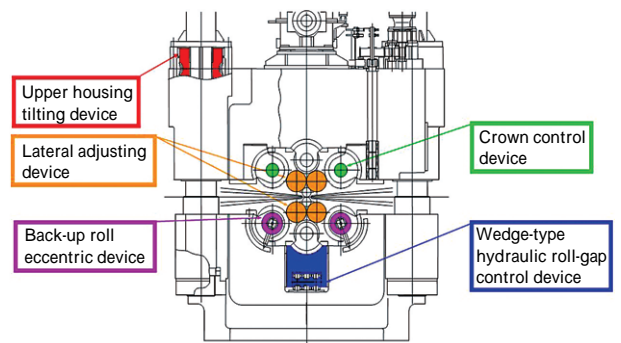


図5 KTミル板厚・形状制御用アクチュエータ配置
Fig. 5 KT mill thickness and flatness actuator arrangement

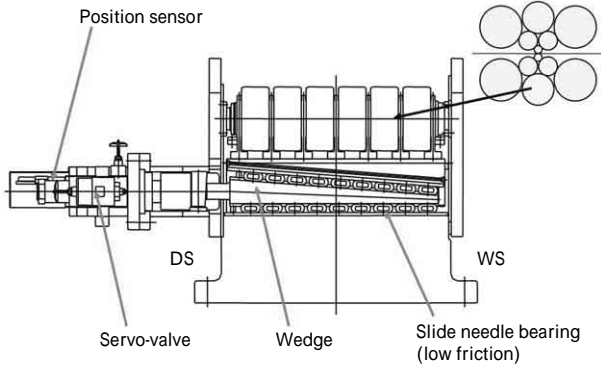


図6 ウエッジ式油圧圧下装置
Fig. 6 Wedge-type hydraulic roll-gap control device

ングの開閉がそのまま直接ロールギャップの開閉となるため、油圧シリンダ内の油の圧縮性の影響がダイレクトに影響し、ミル定数を低下させるが、KTミルでは上記構造のため、ミル定数はほとんど変化しない。また、下記1)~3)により、ステップ応答0.01秒未満の高応答性を実現している。

- 1) ウエッジの端部の油圧シリンダに直動式サーボ弁を直に設置しており、2次側配管内の油の圧縮による遅れを最小化している。
- 2) ウエッジ両面にスライドニードルベアリングを設置し、摩擦抵抗を低減している。
- 3) 制御対象の重量がロールだけであり、上ハウジング全体を昇降させる方式に比べるとKTミルの制御対象重量は約1/100未満と非常に軽い。

3.2 形状制御アクチュエータ

形状制御アクチュエータは、以下に示す4種類の装置を具備している。

3.2.1 クラウン調整装置

ベアリングとサドルにより構成したバックアップロールのうち、上部両側のバックアップロールのサドルをACサーボモータにより個別に押し出し、ワークロールクラウンを圧延中に任意に調整することができる²⁾(図7)。とくに、圧延開始時の加速中のサーマルクラウンによる形状修正などに有効である。

KTミル(12段ミル)のクラウンコントロールの効果は、バックアップロールから中間ロール・ワークロールを経由して圧延材に伝達するのに対して、KSTミル(20段ミル)の場合は、バックアップロールから第2中間ロール・第1中間ロール・ワークロールを経由して圧延材に伝達される(図8)。

KTミルはKSTミルに比べてロール間の接触点が少ないため、クラウン調整装置の効果が大きくなり形状制御性に優れている。極薄板を圧延するには、板形状が極めて重要であるため、極薄板用ミルとしてはKTミルが採用される。

ステンレス圧延におけるKTミルとKSTミルのクラウンコントロールによる効果の比較例を図9に示す。図9の縦軸は、中央部のクラウンコントロールを単位量(mm)作動させたときの板の形状に対する影響度(I-Unit)を示す¹⁾。図9のKTミルの中伸びは約220I-Unit/mmであるのに対し、KSTミルの中伸びは約90I-

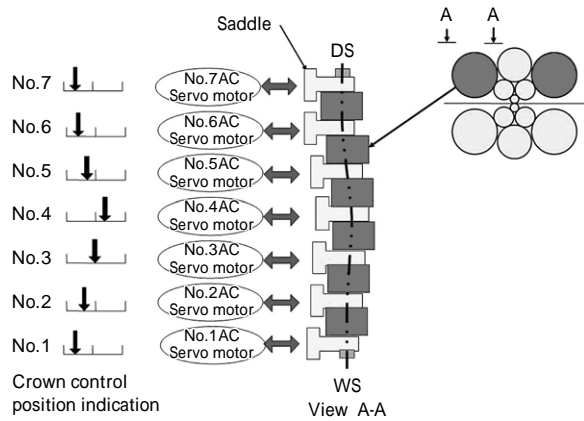


図7 クラウン調整装置
Fig. 7 Crown control device

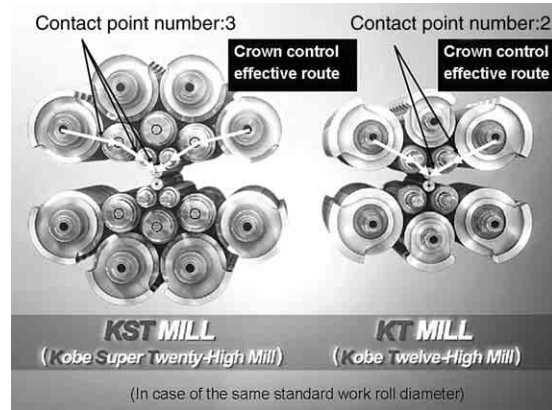


図8 KTミルとKSTミルのロールアレンジメント比較
Fig. 8 Comparison of roll arrangement between KT mill and KST mill (Each of the two configuration has a set of workrolls with the standard diameter.)

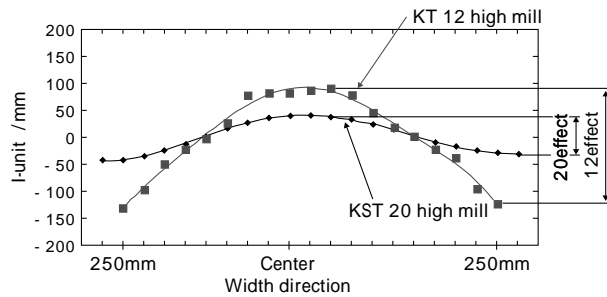


図9 KTミル・KSTミル板中央のクラウン調整による形状影響係数比較(WR: 40mm)
Fig. 9 Comparison of center crown control effect to flatness between KT mill and KST mill (WR: 40mm)

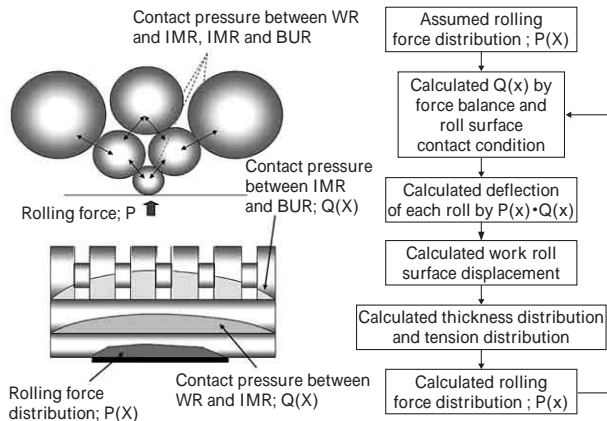


図10 KTミルロール変形・材料変形モデル
Fig.10 KT mill roll deflection and strip deflection model

Unit/mm となり、KT ミルのクラウンコントロールの効果は KST ミルに比べて約 2.5 倍大きい。

また、当社は KT ミル・KST ミル用の形状シミュレータ³⁾を保有している。形状シミュレータは、ロール変形・材料変形モデルに基づく力の釣合いとロール表面変位の適合条件から各ロールのたわみ量を計算し、ワークロールの表面変位を求めて形状計算を行っている(図 10)。

各種条件における計算機シミュレーションの結果からも KT ミルと KST ミルのクラウンコントロールの効果の差異が裏づけられている。

3 2 2 ラテラル調整装置

ラテラル調整装置は、上下の中間ロールを軸方向にシフトさせる装置であり、中間ロール軸端部にはテーパリリーフを設けている。板幅に応じてテーパ開始点の調整を行うことにより、主に板端部の形状修正に有効である。

また、ラテラル調整装置は高トルク油圧モータにより駆動され、力の伝達経路にボールねじを採用してしゅう動抵抗を低減し機械効率の高い機構としている⁴⁾(図 11)。

同じ標準ワークロール径の KT ミルと KST ミルを比較すると、図 8 に示したように、ラテラル調整装置が具備される KT ミルの中間ロールの径は KST ミルの第 1 中間ロール径より大きい。このため、ラテラル調整装置自体をサイズアップして負荷容量の大きなスラストベアリングを使用することができ、KT ミルは KST ミルに比べてラテラルシフト力を約 2 倍大きくすることができる。その結果、KT ミルのラテラル調整による形状修正は、KST ミルより速やかに行うことができる。

3 2 3 チルチング装置

チルチング装置は、4 柱式分離型ハウジングミルの特徴を生かし、上ハウジングの作業側(WS)と駆動側(DS)を同時に逆方向へ作動させて上ハウジングを傾斜させる装置である。全圧延荷重を一定に保ちながら、板形状の作業側と駆動側のアンバランスを修正するのに有効である(図 12)。

3 2 4 支持ロール偏心装置

支持ロール偏心装置は下両側のバックアップロールに

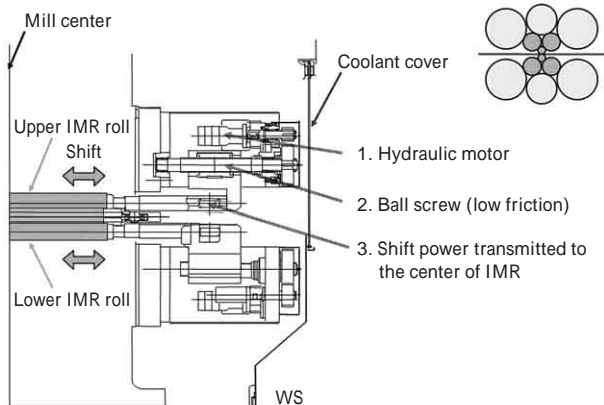


図 11 ラテラル調整装置のメカニズム
Fig.11 Mechanism of lateral adjusting device

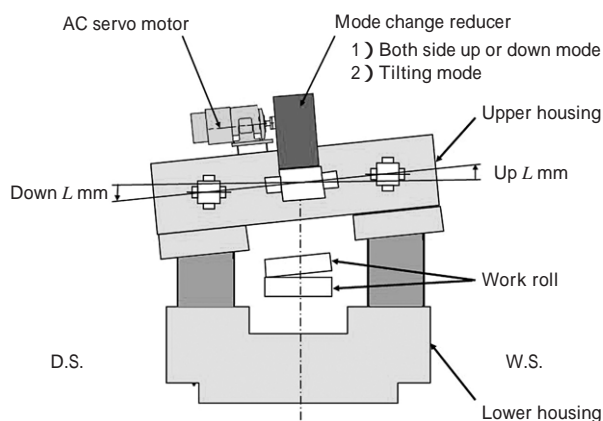


図 12 チルチングのメカニズム
Fig.12 Tilting mechanism

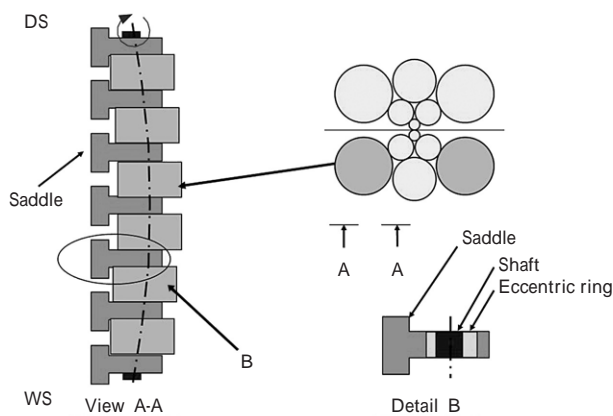


図 13 支持ロール偏心装置
Fig.13 Back-up roll eccentric device

設置されており、板幅方向全体のクラウン量を調整する装置である。各サドルを個別に押出すクラウンコントロールとは異なり、サドル内に偏心量の異なる偏心リングを組込んで支持ロール軸を回転させることにより、下両側のバックアップロール全体のクラウン量を変更できる(図 13)。本装置を具備することにより、KT ミルでは通常フラットワークロール(ロールクラウンのないワークロール)を使用している。

4. 電気制御システム

電気制御システムは図 14 に示すように主幹コントローラ、自動板厚制御コントローラ(以下 AGC コントローラという)、自動形状制御コントローラ(以下 AFC コントローラという)、ヒューマン・マシン・インターフェイスシステム(以下 HMI システムという)、モータ駆動装置などから構成される。

- 1) 主幹コントローラは KT ミルの制御システムの中核を担っており、速度制御、張力制御指令の出力をはじめ、各種の入出力機能を有している。
- 2) AGC コントローラは、最速 0.001 秒の高速周期で板厚制御アクチュエータである油圧圧下ウエッジを制御し、応答速度(ステップ応答) 0.01 秒未満、ロールギャップ位置決め精度 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 以下を達成し、高い精度の板厚を実現している。
- 3) AFC コントローラは、形状検出装置で検出したデー

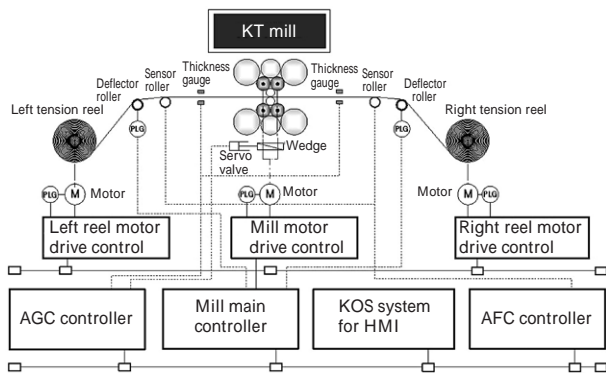


図14 電機制御システム
Fig.14 Electric control system

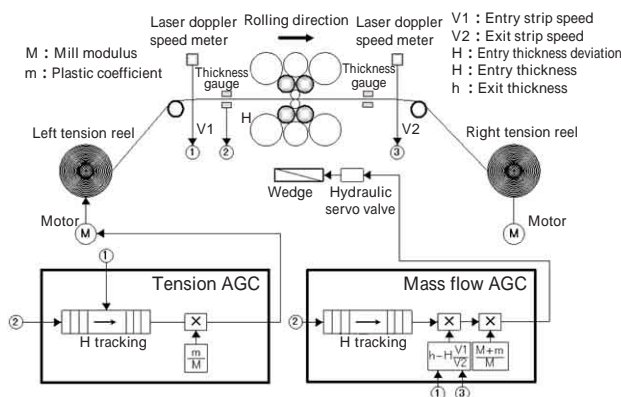


図15 マスフロー AGC と張力 AGC 制御システム
Fig.15 Mass flow AGC and tension AGC control system

タを取込み、検出形状と目標形状との偏差を最小化するために各種の形状制御用アクチュエータにそれぞれ最適な制御量を出力し、良好な板形状を実現している。

- 4) HMI システムは圧延機のプリセット、データロギング、運転状況表示、集中操作、故障履歴の管理などを行い、操業の省力化、標準化を達成している。なお、当社では、HMI システムを KOS (Kobelco Operation Support system) システムと呼んでいる。
- 5) モータ駆動装置は、表面品質が極めて厳しい極薄板ステンレス用としては、2007 年納入の KT ミル 2 台 (表1)において世界で初めて AC ベクトルインバータドライブを採用した。従来、表面品質の厳しい極薄板ステンレスの圧延では、AC ドライブのトルクリップルによる速度むらがあり、特に低速圧延において板表面にチャタマークを発生させることが危惧され使用されなかった。当社では AC ベクトルインバータの技術進歩の内容を評価し、精密速度制御および精密張力制御が可能と判断した上で、メンテナンスが容易な AC ドライブを採用した。

5. 自動板厚・形状制御

自動板厚制御としては、BISRA-AGC、モニタ AGC、FF-AGC、マスフロー AGC、張力 AGC の各モードを具備している。また、自動形状制御は、当社独自に開発した多変数制御モデルによる制御システムを用いている。

5.1 自動板厚制御

極薄板ステンレスの圧延では、各種の AGC モードのうち、とくに図15に示すマスフロー AGC と張力 AGC が効果を発揮することから、ここではこの2つを紹介する。

5.1.1 マスフロー AGC

マスフロー AGC は、入・出側の板速度と入側板厚から出側板厚推定値を演算し、出側板厚偏差がゼロとなるようロール間隙を変化させる自動板厚制御方式である。とくに、前後端部、加減速部の板厚変動の精度向上に効果が大きい。さらには、板厚に影響をおよぼす形状制御アクチュエータの動きにより発生した板厚変動量を圧延材料速度変化からリアルタイムにとらえ、遅れ時間なく油圧圧下ウェッジを動作させて板厚変動を除去すること

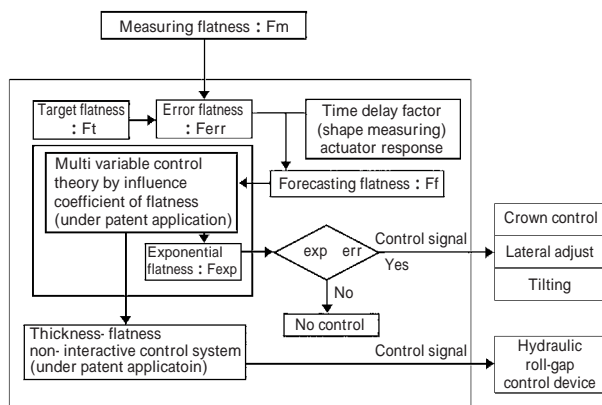


図16 自動形状制御システムのアルゴリズム
Fig.16 Algorithm for automatic flatness control system

ができる。

マスフロー AGC では、板速度の検出精度が一つのキープポイントである。レーザドップラ方式の非接触式板速度計を用いて制御した例では、板厚 0.05mm において定常圧延部で $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 以下、加減速部においても $\pm 1 \mu\text{m}$ 以下の板厚精度を達成している。

5.1.2 張力 AGC

張力 AGC は、極薄板圧延でロールギャップを変化させても板厚が変化しない状態、いわゆるロールキスが発生した状態での板厚制御に効果がある自動板厚制御方式である。板厚変化に合わせて、巻戻側リールの張力を増減することにより板厚を制御する。また、圧延を安定させるために張力増減量の大きさおよび圧延速度を制御している。

5.2 自動形状制御

自動形状制御システムとしては、図16に示すように、当社独自の影響係数を用いた多変数制御モデルを用いている⁵⁾。影響係数とは各形状アクチュエータを単位量移動させたときの形状変化量であり、圧延機固有の挙動特性を表したものである。

KT ミルにおける形状制御アクチュエータとしては、クラウン調整装置、ラテラル調整装置、チルチング装置という特性の異なる装置があるが、自動形状制御システムは、形状を最適化するために各アクチュエータの特性に応じて適正な出力指令を与えている。

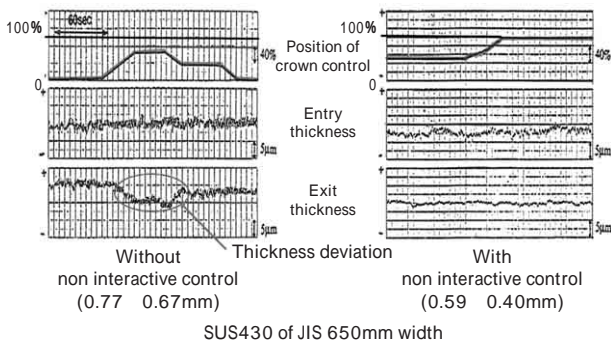


図17 ステンレス圧延における非干渉制御の実行例
Fig.17 Results of non-interactive control in stainless steel rolling

5.3 板厚・形状非干渉制御システム

形状制御アクチュエータ、とくにクラウン調整装置を作動させると、形状のみならず板厚をも変化させてしまう場合がある。したがって、板厚精度と形状精度の両者を高いレベルで確保するためには、両者の干渉を防止しなければならない。

KTミルは、当社が独自に開発した板厚変化を予測して板厚変化を最小限に抑える板厚・形状非干渉制御システムを具備している。本システムは、図16に示した自動形状制御アルゴリズムに組み込まれており、板厚と形状の相互干渉を防止している。

圧延中にある形状制御アクチュエータを変化させたとき、板厚の微小な変化量を板厚影響係数として形状制御アクチュエータごとにあらかじめ採取しておく。自動形状制御を行う際は、最も板厚への影響が少ない制御となるように各アクチュエータの制御出力を組合せて出力する。この制御を上位非干渉制御と称す。さらに、上位非干渉を行った結果として予測される微小な板厚変動分を、板厚専用アクチュエータである油圧圧下ウエッジを用いて同時に補償する。この制御方式を下位非干渉制御と称し、システム全体では両者を用いている⁶⁾。

非干渉制御の効果を確認するために、非干渉制御を実施(ON)した場合と実施しない(OFF)場合の出側板厚変動量の比較例を図17に示す⁷⁾。非干渉制御を実行しない場合にクラウン調整装置を作動させたときは数 μm 程度の板厚変動が発生したが、非干渉制御を実行した場合は有意と判断される出側板厚変動は発生していない。

6. 板表面品質

6.1 表面しわ発生防止

極薄板圧延では、板厚が薄いため板そのものの剛性が弱く、板表面にしわが発生しやすくなる。極薄板用KTミルでは、図18に示すように、デフレクターローラとテンションリールの間にサポートローラを設置することによって極薄板の拘束点間の距離を短くし、表面しわの発生を防止している。

サポートローラは、最適な設置位置で板を拘束できるよう、巻取コイル径の変化に伴って圧延中に移動させることができる。また、テンションリールの巻取点近傍にアイロンローラを設置し、テンションリールに巻取られる極薄板の表面に一定の圧力で押付け、巻取の際のエア

の巻込などによるしわ発生を防止している。

巻取コイル径の変化に伴ってアイロンローラの自重方向ベクトルが変化するため、板への押付け圧が変化する。しかしながらこの変化分は、アイロンローラ押付けシリンダに補正を加えることにより、巻取コイル径にかかわらず極薄板表面への押付け力は巻取開始から終了まで一定に保つことができる。

サポートローラとアイロンローラは上記のような重要な役割を持っているが、一方で、板表面に接触するローラ数が増えるとスリップきずが発生する懸念も増加する。

6.2 板表面スリップきず対策

極薄板は電子材料用に使用されるため、スリップきずの管理基準は一般に、通常の板材料よりも厳しい。しかしながら、極薄板圧延では、圧延時の張力が通常の板圧延に比べると小さくなるため、板表面に接触するローラ類に起因するスリップきずが発生しやすくなる。

KTミルにおいては、スリップに起因するきず対策として、板に接触するローラ全てに駆動装置を装備し、レーザドップラ速度計にて検出した板速度を基準として速度同調させ、板きず発生を防止することがある。図19にサポートローラ、アイロンローラを駆動するメカニズムを示す。この方式による速度同調精度は $\pm 0.5\%$ 以下

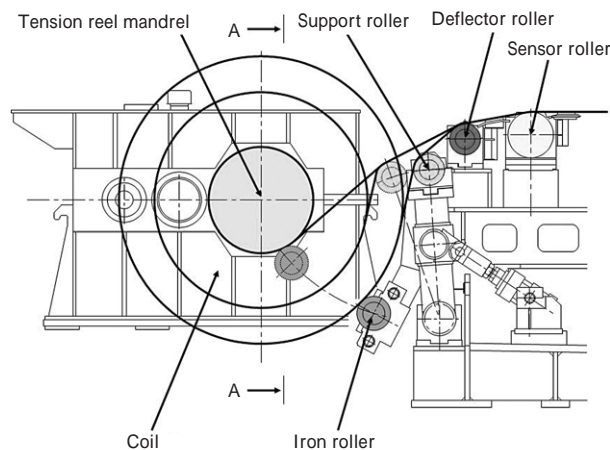


図18 サポートローラとアイロンローラ
Fig.18 Support roller and iron roller

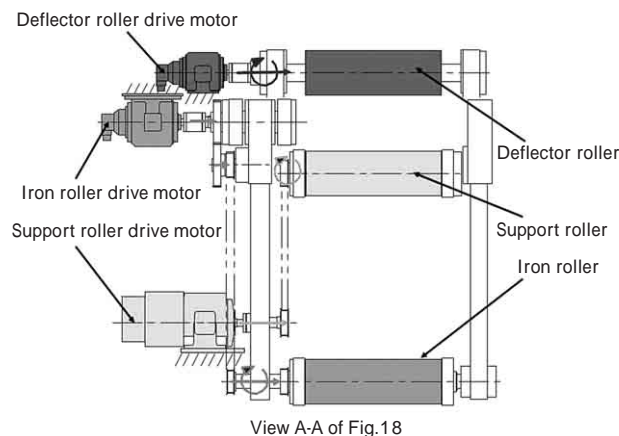


図19 サポートローラ・アイロンローラ駆動メカニズム
Fig.19 Helper drive mechanism of support roller and iron roller

である。

ローラ駆動メカニズムは、駆動源のアクチュエータ（AC モータ）をローラの軸端に設置して駆動するのが一般的な方法である。しかし、図 18 で示されるように、サポートローラとアイロンローラは、テンションリールに巻付けるコイル径の時々刻々の変化に応じてローラ的位置が移動するため、ローラ軸端に AC モータを設置すると AC モータも移動することとなる。

当社では、図 19 に示すように動力伝達機構に工夫を施すことにより、AC モータを固定部に設置し、移動部へのモータ取付に伴う振動などの外部からの影響をなくしている。また、固定配線とすることによってトラブル発生を低減し、かつメンテナンス性を向上させている。

むすび=近年、KT ミルは極薄板ステンレス圧延に対応できる高品質・高性能圧延設備としてユーザから高い評価を得ている。今後、極薄板ステンレスの生産においては、さらなる薄物化と生産性の向上がテーマと考える。さらには、極薄板用ステンレス圧延設備においても、作業者の高齢化に伴う熟練工の技能伝承に対応して

いく必要がある。

薄物化に際しては、ロールキス圧延における板破断の防止および形状精度の向上が課題であり、生産性向上のためには、圧延速度の向上、圧延コイルの広幅化が指向されると考える。また、技術伝承に関しても、当社独自の HMI システム（KOS システム）に設備メンテナンスや故障予知といったベテランの現場技能者のノウハウを盛り込み、さらに拡充させていくことにより対応していきたい。

参 考 文 献

- 1) 上杉憲一：METEC, InSteelCon, 2007 (2007.6) pp.139-141.
- 2) 北川聡一ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.48, No.1(1998) p.44.
- 3) 服部重夫ほか：KOBELCO TECHNOLOGY REVIEW, No.2 (1987.8) pp.4-5.
- 4) 上杉憲一ほか：第 120 回圧延理論部会, 圧理 120-11(2004) p.2.
- 5) 坪野 肇ほか：R&D 神戸製鋼技報, Vol.41, No.1(1991) p.101.
- 6) 前田恭志ほか：塑性と加工, 第 32 巻, 第 363 号 (1991.4) pp.473-474.
- 7) 北川聡一ほか：第 43 回塑性加工連合講演会 (1992.10) p.685.